

Cuantificación de incertidumbres en el trasvase de tráfico de mercancías en ejes de transporte.

Blanca Arenas Ramírez

UPM-INSIA

José Mira McWilliams

UPM-INSIA

José Antonio Alegre

UPM-INSIA

José María López

UPM-INSIA

Camino González Fernández

UPM-ETSII

Francisco Aparicio Izquierdo

UPM-INSIA

RESUMEN

El objetivo del trabajo es el desarrollo de un simulador del proceso de trasvase de mercancías de la carretera al ferrocarril en ejes de transporte seleccionados, con la estimación de la incertidumbre en cada una de las etapas en las que se descompone el proceso con el horizonte del año 2020. Las etapas son: estimación del tráfico terrestre -carretera y ferrocarril- de mercancías (total y por tipos) y en los ejes de transporte seleccionados, estimación de los factores de ocupación en ambos modos, estimación de las proporciones de trasvase modal (total y por tipos) en cada eje y finalmente la estimación del impacto medioambiental de las toneladas trasvasadas, en términos de emisiones contaminantes en toneladas de CO, CO₂, NO_x, CH₄, NH₃, etc. Cada una de estas estimaciones presenta incertidumbre, que debe ser cuantificada a través de un enfoque estadístico, de forma que la incertidumbre de la variable final o respuesta del proceso (emisiones) recoja la propagación de las incertidumbres a través de las etapas, para las que se proporcionan horquillas. El cálculo de la propagación de las incertidumbres no es factible analíticamente y por ello se recurre a la simulación estocástica de Monte Carlo. En este trabajo se presenta la metodología para la cuantificación de incertidumbre de los factores que intervienen en el proceso de trasvase de mercancías de la carretera a otro modo (ferrocarril).

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se ha desarrollado en el contexto del proyecto de investigación “Desarrollo de una metodología integrada para la evaluación de externalidades (seguridad y el medio ambiente) del trasvase modal carretera – ferrocarril -MODALTRAM”, que tiene como objetivo estudiar la viabilidad del trasvase de mercancías de la carretera al ferrocarril, que en el año 2010 tuvo una cuota de participación de 2,81% en toneladas (3,05% medido en

toneladas-kilómetro) y su repercusión en la accidentalidad e impacto medioambiental. Para la evaluación del efecto del trasvase sobre el medio ambiente, se debe considerar la propagación de incertidumbres en todo el proceso teniendo presente el horizonte temporal que se considera en este proyecto. El proceso en un escenario de trasvase, está constituido por varias etapas, que comienza por la estimación del tráfico terrestre - carretera y ferrocarril- de mercancías (total y por tipos) y en los ejes de transporte seleccionados, la estimación de las proporciones de trasvase modal (total y por tipos) en cada eje y la estimación del impacto medioambiental de las toneladas trasvasadas entre modos terrestres, en términos de emisiones contaminantes; gases precursores de ozono troposférico (CO, NO_x, COVNM, CH₄), gases acidificantes (NO_x, NH₃ y SO₂) así como los gases de efecto invernadero en toneladas equivalentes de CO₂.

La variable de salida del proceso son las emisiones que se pueden ahorrar o dejar de emitir en la carretera por el trasvase al ferrocarril. Para calcular su promedio y su variabilidad (incertidumbre) es necesario cuantificar la de cada etapa y acoplar las incertidumbres de las etapas para su propagación a la respuesta. Esta tarea de propagación no es en general factible analíticamente, debido a la complejidad del acoplamiento de las distintas etapas. Por ello, se recurre a métodos numéricos, particularmente la simulación estocástica por Monte Carlo. El método de Monte Carlo se desarrolló a finales de los años 40 del siglo pasado en el contexto de la simulación de neutrónica (Metropolis et al. 1953) y a partir de entonces ha experimentado un gran crecimiento, particularmente en los últimos tiempos debido al abaratamiento y aumento de la velocidad de computación.

En este trabajo se hace especial énfasis en la primera etapa del simulador, la estimación y predicción de las toneladas mediante modelos ARIMA de series temporales tanto univariantes, es decir teniendo en cuenta exclusivamente la propia inercia de la serie, como bivariantes, es decir incorporando la información de otra serie relevante como el PIB, para reducir la incertidumbre de las predicciones, como surge de la comparación de los resultados.

El modelado del proceso completo se realiza en el eje de tráfico Madrid-Guipúzcoa, pero la metodología es extensible a otros ejes como el Almería-Barcelona. Ambos ejes forman parte de los corredores de la Red Transeuropea de Transporte. El primero dentro del Corredor Atlántico y el segundo dentro del Corredor Mediterráneo ambos incluidos en el plan de infraestructuras del Ministerio de Fomento y avalado por la Comisión Europea en octubre de 2011.

En la sección 2 se presentan algunos de los datos fundamentales de las mercancías de interés para el trasvase en el eje seleccionado, en la sección 3 el esquema del simulador, en la sección 4 se presenta de forma esquemática el modelado de las etapas. En la sección 5 se analizan algunos resultados, y se extraen sus implicaciones sobre el simulador en su conjunto.

2. EJES Y TRÁFICOS DE MERCANCÍAS POTENCIALES DE TRASVASE.

2.1 Ejes de transporte seleccionados

El Corredor Atlántico se constituye como un corredor multimodal que desde la frontera

francesa conectará con los principales modos del arco atlántico y Portugal.

El corredor ferroviario recoge en la Red Básica la conexión con la frontera francesa por Irún, con la portuguesa en Fuentes de Oñoro (Salamanca), para terminar en los puertos de Oporto y Aveiro así como con conexión con todo el noreste de España. Conecta las ciudades de Irún, San Sebastián, Vitoria, Burgos, Palencia, Valladolid y Salamanca con conexiones a:

- Bilbao. A través de la alta velocidad de la Y vasca de la Red Básica.
- Santander. Compartiendo trazado con el Corredor Cantábrico – Mediterráneo dentro de la Red Global.
- León y Asturias, llegando a Oviedo y Gijón en Red Básica y con Avilés con la Red Global.
- Galicia. En mercancías y dentro de la Red Básica desde León, pasando por Ponferrada, Monforte de Lemos, Ourense, Vigo, Pontevedra, Santiago y A Coruña.
- Madrid. En mercancías por Ávila.

Las inversiones totales a realizar en éste Corredor Atlántico, en el periodo 2014 – 2020 ascienden a 11.699 millones de euros

El Corredor Mediterráneo se constituye como un corredor multimodal, viario y ferroviario que conecta la frontera francesa con los principales nodos del mediterráneo. La Red Básica conectará las ciudades de Girona, Barcelona, Tarragona, Castellón, Valencia, Alicante, Murcia, Cartagena y Almería y enlazará a través del eje transversal andaluz con Granada y Antequera, ciudad en la que se bifurca para finalizar en Sevilla y Algeciras, ramal que comparte con el Corredor Central. En la Red Global se contempla la conexión ferroviaria desde Sevilla con Cádiz y Huelva mediante líneas de alta velocidad, y de Málaga con los corredores Central y Mediterráneo a través de su enlace por Antequera con la línea de alta velocidad ya existente. Las inversiones totales previstas en éste corredor alcanzan los 19.424 millones de euros entre 2014 y 2020.

Para este trabajo se ha elegido el eje de tráfico Madrid-Guipúzcoa como parte del futuro Corredor Atlántico.

2.2 Tráfico total trasvasable

Para la clasificación de mercancías por carretera se adopta la NST 20 -Standard Goods Classification for Transport Statistics- utilizada por Eurostat. Otra clasificación es la NST/R que utiliza 3 dígitos.

En la Tabla 1 se muestran las toneladas, toneladas –km y distancias promedio del transporte interior de mercancías durante el año 2010 para el conjunto de España, de los que se han sustraído aquellos grupos de mercancías que por alguna razón -precio, distancia media, naturaleza del producto, calidad del servicio, etc. - no son productos que se puedan considerar de interés para el trasvase al ferrocarril, como son las:

- Mercancías de los grupos NST 13 (Muebles y otros artículos manufacturados), NST 15 (Correo, paquetes) y NST 17 (Mercancías trasladadas durante mudanzas privadas y profesionales; equipajes transportados por separado de los viajeros: vehículos de motor trasladados para su reparación) de las que en los tres últimos años no se ha transportado

nada por ferrocarril.

- Mercancías de los grupos NST 5 (Productos de la industria textil y la confección), NST 16 (Equipos y materiales utilizados en el transporte de mercancías) y NST 20 (Otros artículos), de las que hay algunos años en los que no se ha transportado por ferrocarril, y otros en los que el transporte de ellas fue menor que 2.000 toneladas/año.

La cantidad teóricamente captable o de interés para el trasvase ferroviario a nivel nacional es de 1.433.813.604 toneladas.

Tipo	Toneladas	Toneladas-kilómetro	Distancia media (km)
Transporte interior total de mercancías	1.502.375.200	146.203.973.944	97
Transporte de mercancías que no lleva el ferrocarril	68.561.596	15.854.618.724	231
Teórica captable por el ferrocarril	1.433.813.604	130.349.355.220	91

Tabla 1 – Transporte interior total. Año 2010.

En la Tabla 2 se muestra para el año 2010 y en el conjunto de España, las toneladas, toneladas –km y distancias promedio del transporte interior de mercancías “teóricamente trasvasable” por intervalos de distancia.

Cortes de distancias (km)	Toneladas	Toneladas-kilómetro	Distancia media (km)
$D \leq 300$	1.301.042.285	59.343.393.225	46
$300 < D \leq 600$	92.429.751	39.760.395.242	430
$D > 600$	40.341.568	31.245.566.752	775
Total	1.433.813.604	130.349.355.219	91

Tabla 2 - Transporte interior de mercancías “teóricamente trasvasable”.

Si sólo se consideran las distancias medias, existe consenso en los trabajos consultados que distancias menores de 300 km no son de interés para el transporte ferroviario y el criterio dominante es que “los transportes de carga a corta y media distancia (inferior a unos 300 kilómetros) seguirán realizándose en gran medida por camión” (“Libro Blanco de Transporte 2011”. Comisión Europea). En distancias comprendidas entre 300 y 600 km, los escenarios de trasvase deben tener en cuenta si son necesarios acarreo que suman una dificultad adicional para el transporte ferroviario. Por último, el ferrocarril puede competir con ventaja con la carretera en el transporte a más de 600 kilómetros, e incluso absorber los costes de acarreo en origen y destino para realizar el transporte de terminal a terminal como es el caso de contenedores. Desde el punto de vista del interés que para el transporte ferroviario tienen las mercancías, hay otros factores a considerar como precio, naturaleza del mismo, calidad del servicio, entre otros.

2.3 Tráfico por tipo de mercancías en el eje seleccionado: Madrid-Guipúzcoa

En la Tabla 3 se muestran los tráficos de mercancías por carretera (t-t-km y dm) por grupos NST 20 en el eje Madrid – Guipúzcoa (M-G) en ambos sentidos (suma de ambos sentidos en columna I-V) en el año 2010. De forma agregada, el 57,1% de las toneladas se transportan en el sentido M-G.

Ambos sentidos. Año 2010				Reparto % de t Total y por tipos de mercancías. Por sentido		
Grupos de códigos NST (20) de la mercancía	Toneladas	Toneladas-km	Distancia media (km)	I-V (% de total)	M-G	G-M
10	341.365	161.133.140	472	29,8%	75,9%	24,1%
15	153.590	74.818.444	487	13,4%	40,6%	59,4%
12	110.990	56.719.614	511	9,7%	11,8%	88,2%
4	100.400	48.220.303	480	8,8%	63,7%	36,3%
6	93.868	44.577.648	475	8,2%	10,3%	89,7%
9	70.774	32.185.354	455	6,2%	60,8%	39,2%
14	70.488	34.045.099	483	6,1%	100,0%	0,0%
8	41.309	19.875.149	481	3,6%	50,8%	49,2%
16	38.880	18.473.809	475	3,4%	86,1%	13,9%
18	37.077	18.170.091	490	3,2%	49,1%	50,9%
13	28.431	13.322.047	469	2,5%	37,6%	62,4%
11	14.673	7.567.635	516	1,3%	28,5%	71,5%
3	13.937	7.386.771	530	1,2%	100,0%	0,0%
7	13.937	8.362.382	600	1,2%	100,0%	0,0%
19	13.126	6.654.755	507	1,1%	100,0%	0,0%
1	4.443	2.132.632	480	0,4%	100,0%	0,0%
Total	1.147.288	553.644.876	483	100,0%	57,1%	42,9%

Tabla 3- Tráfico de mercancías por carretera (t-t-km y dm) por grupos NST 20 en el eje Madrid – Guipúzcoa (M-G) en ambos sentidos.

En el desarrollo del proyecto se ha establecido la correspondencia entre ambos sistemas de clasificación por carretera NST 20 y NST/R y el correspondiente al ferrocarril (grupo tarifario) para la estimación de tráficos a trasvasar¹. Los productos que superaron una cuota

¹ Por ejemplo, al grupo 4 del NST-20 (productos alimenticios, bebidas y tabaco) se corresponde con los _____

ferroviaria del 8% (de las t-km del transporte terrestre y con equivalencia en la clasificación NST 20) en 2010 son:

Relación: FFCC / Transporte terrestre (año 2010)			
NST 20	Observaciones	% Toneladas	% Toneladas-km
Participación del ferrocarril > 8%			
19	Mercancías no identificables	17,00	61,15
02	Hulla, antracita y lignito; petróleo crudo y gas natural	14,18	17,74
12	Material de transporte	6,80	14,58
10	Metales básicos, productos metálicos, excepto maquinaria y equipo	6,65	13,22
07	Coque y productos de petróleo refinado	1,28	8,68

Tabla 4– Relación: FFCC / Transporte terrestre (año 2010)

De ambas tablas (3 y 4), se desprende que:

- 1) Los grupos NST 10 (siderurgia) y NST 12 (automóviles), por su volumen de transporte ferroviario y distancia media son de interés para el trasvase modal. Además, presentan la ventaja de tener apartaderos en origen y/o destino y por lo tanto no requieren acarreos.
- 2) El grupo NST 10 se corresponde con el Grupo tarifario 14 de RENFE. En el año 2010, sus cuotas de transporte fueron: el 3% en t y 8% de t-km del total de toneladas transportadas por carretera, el 29,8% en t y 29,1% en t-km en el eje M-G (ambos sentidos)-Tabla 3- y el 6,65% en t y 13,22% en t-km del transporte por ferrocarril -Tabla 4-. Su interés para el trasvase puede considerarse elevado.
- 3) Hay dos grupos de mercancías NST 19 y NST 7 que en el año 2010 se transportaron por carretera sólo en el sentido M-G y que para el ferrocarril son productos que tienen una alta cuota de participación (17% y 1,28% de las toneladas respectivamente). Su interés para el trasvase puede considerarse alto.
- 4) Existen otros productos (grupos NST 18, 6, 1, 8, 9 y 3) que tienen más del 2% de cuota ferroviaria (en % de transporte total terrestre) cuyo interés para el trasvase, debe considerarse teniendo en cuenta el resto de criterios como precio, distancia, adecuación de la mercancía, disponibilidad de apartadero en origen y/o destino, etc.

En la Figura 1 se ilustra de forma porcentual los volúmenes de transporte de mercancías en 3 intervalos de distancia en el eje M-G, sentido M-G. Si bien la distancia media de transporte del producto NST 10 es de 484 km, el 29,09% de las t se realizan en el intervalo de distancia 400-500 km. y un 10,49% a más de 500 km, según los datos de la ETMC (2010).

grupos 122 (cerveza), 139 (preparados alimenticios no especificados anteriormente), 163 (otros productos a base de cereales), 166 (preparaciones y conservas a base de verduras y/o legumbres) del NST/R.

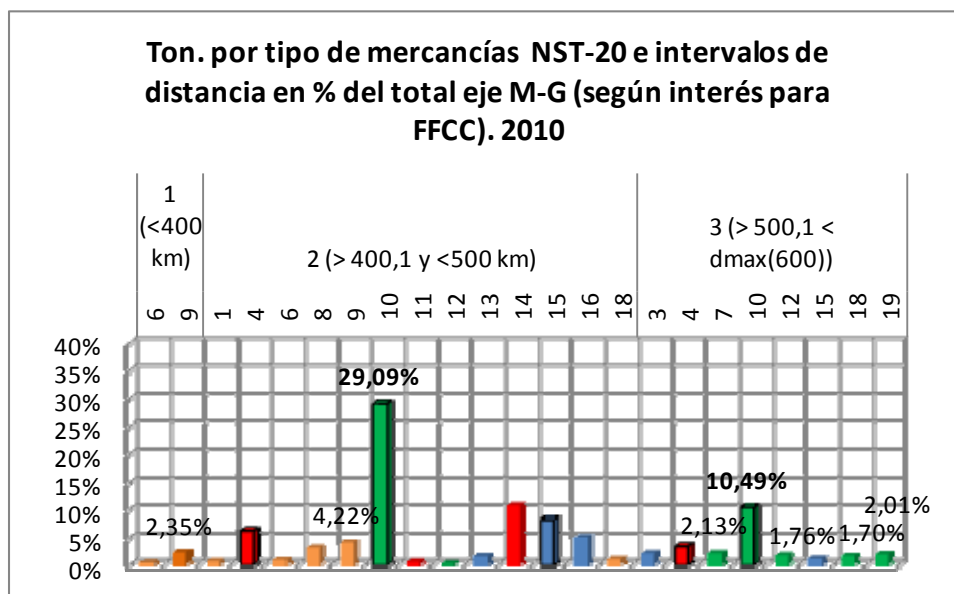
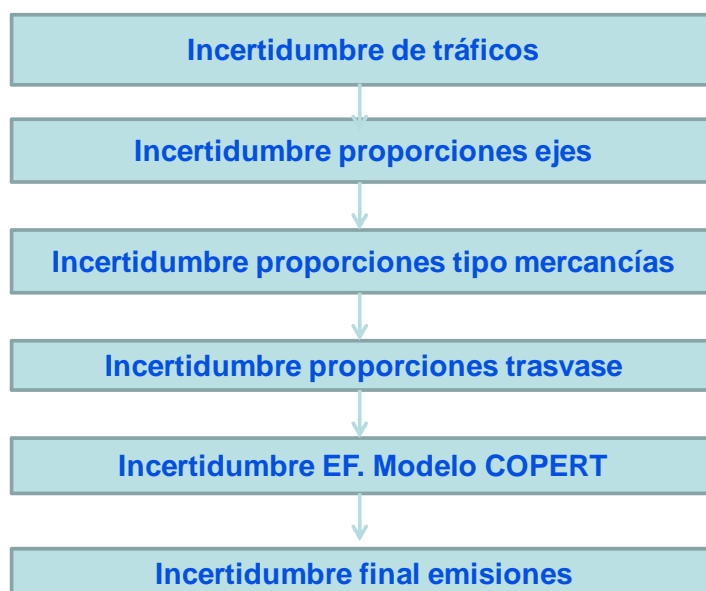


Fig. 1 –Transporte de mercancías en 3 intervalos de distancia en el eje M-G.

3. ESQUEMA Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SIMULADOR

3.1 enfoque integrado del simulador

La estimación y predicción de los modelos estadísticos se hace de forma integrada mediante el paquete estadístico R (R Development Core Team, 2008), que es público, con buenas capacidades gráficas y para el cual ha aumentado en gran medida el número de herramientas en los últimos años. El enfoque integrado permitirá actualizar de forma automática las previsiones a medida que se incorporan nuevos datos en el período temporal adoptado.



4. MODELADO DE ETAPAS DEL SIMULADOR

4.1. Estimación de tráfico de mercancías

La serie disponible de t y t-km en carretera para toda España, tiene frecuencia trimestral desde el año 1994 hasta el último trimestre de 2013. El modelado que se aplica en este

trabajo tiene dos vertientes: a corto plazo y a largo plazo, en el corto plazo se pueden a su vez aplicar los modelos ARIMA univariantes y modelos ARIMA bivariantes. Para el modelado bivalente, se dispone además de la serie de PIB trimestral en el periodo 2000-2013. El resultado es la estimación de la distribución de probabilidad para los futuros tráficos, incorporando predicciones puntuales y bandas de incertidumbre.

4.1.1 Modelado a corto plazo

4.1.1.1. Modelado ARIMA univariante

Los modelos ARIMA fueron desarrollados por Box y Jenkins en su trabajo seminal de 1970, aunque una extensión más utilizada es Box, Jenkins y Reinsel (1993). Una referencia clara y completa en español es Peña (2005). En los modelos ARIMA se supone que el valor de una variable aleatoria dinámica para un instante t es una función lineal de sus propios retardos más un ruido aleatorio. Un ejemplo sencillo, con dependencia exclusivamente autorregresiva, es $y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + u_t$ donde u_t es el término de error aleatorio (ruido blanco).

Para los cálculos se utilizan los paquetes arima y forecast del software R. Una referencia muy interesante sobre uso de R para series es Pfaff (2008).

4.1.1.2 Modelado ARIMA bivalente

En el epígrafe anterior se ha utilizado, para explicar la serie, solamente su propia inercia. Si se piensa que otra serie (en nuestro caso el PIB) puede aportar información adicional relevante, se puede incluir en el modelo de dos formas:

Suponiendo una relación exclusivamente contemporánea entre las dos series, es decir que la relación es estática: la serie explicada en el instante t solo depende del valor de la serie explicativa en ese mismo instante, y por tanto que no depende también de retardos (valores anteriores a t) de la explicativa.

Se supone que también son relevantes los retardos, en cuyo caso la relación es dinámica. Hay a su vez dos situaciones posibles en este contexto:

1. Que la relación causa-efecto es unidireccional, es decir, solamente de la serie explicativa a la serie explicada pero no al revés; para esta situación se aplican los modelos de función de transferencia. Un ejemplo sencillo de estos modelos, con dependencia exclusivamente autorregresiva, cuya expresión es:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 x_{t-1} + \theta_2 x_{t-2} + \dots + \theta_q x_{t-q} + u_t$$

Donde los coeficientes ϕ modelan la dependencia respecto de la propia inercia y los θ respecto de la inercia de la serie explicativa. u_t es el error aleatorio (ruido blanco). En nuestro caso, y_t son los consumos y x_t el PIB.

2. Que la casualidad es bidireccional o con realimentación (feedback); en ese caso se trata de modelos de ecuaciones simultáneas o modelos VARMA (Vector Autoregressive Moving Average).

En este trabajo se supone que el PIB causa los tráficos pero no al revés, con lo cual se aplicaría un modelo de función de transferencia. Para los cálculos se utiliza el paquete vars

del software R.

4.1.2. Modelado a largo plazo

A largo plazo, la inercia temporal de la serie se ha diluido y lo más razonable es calcular las predicciones en función de escenarios de evolución del PIB, que es la variable que refleja la actividad económica. Para ello es necesario estimar la dependencia de las t-km respecto del PIB, que se realiza mediante modelos de regresión.

Hipótesis

- Se plantean escenarios de evolución temporal de la serie hasta 2020, con porcentajes de crecimiento o decrecimiento constantes con el tiempo dentro de cada escenario.

4.2 Modelado para la proporción de tráfico en el eje Madrid – Guipúzcoa.

Para modelar la incertidumbre asociada a las proporciones de tráfico se asumen las siguientes hipótesis:

- Se utilizan distribuciones uniformes o gaussianas que deben calibrarse (estimarse) a partir de datos o, en su ausencia de juicio de expertos.
- Se supone independencia respecto de las toneladas transportadas en el conjunto de España por carretera.
- La proporción que suponen los ejes respecto del total de España se mantiene constante a lo largo del tiempo en el valor conocido de 2010.

La estimación puntual (centro de la horquilla de incertidumbre) para la proporción de mercancías transportadas en este eje respecto del total nacional, se obtendría dividiendo toneladas transportadas en el eje M-G por las totales en territorio nacional resultante de la etapa anterior 4.1. Un enfoque alternativo sería considerar la proporción que supone cada tipo de mercancía en el eje Madrid-Guipúzcoa respecto del total nacional, pero esto supondría modificar también la etapa siguiente sin mejora aparente de precisión en el modelado.

4.3 Modelado para la proporción de mercancías de cada tipo en cada eje

Hipótesis

- La incertidumbre asociada a las proporciones de mercancías de cada tipo en el eje se trata de forma análoga a la de 4.2, suponiéndose a priori independencia entre ambos conjuntos de variables.

En la columna I-V de la Tabla 3 se presentan las proporciones de las t transportadas por cada grupo de mercancías en el eje Madrid-Guipúzcoa durante el año 2010. Estas proporciones se pueden tomar como valor puntual (centro de la horquilla de incertidumbre). Por ejemplo, para el grupo NST 10 es 29,8%.

4.4 Modelado para la proporción de tráfico trasvasable en cada eje y por tipo de mercancía

Hipótesis:

- 1) La incertidumbre asociada a las proporciones de tráfico trasvasado en cada eje y por tipo de mercancía se trata de forma análoga a las de los etapas 4.2 y 4.3, suponiéndose a priori independencia entre estas proporciones y las dos anteriores.
- 2) De acuerdo con la literatura, a la hora de dar la horquilla de % trasvasable, se pone como tope la duplicación de la cuota del ferrocarril en el año 2010.
- 3) El incremento total se reparte uniformemente en el intervalo 2010-2020

Se ilustra la metodología a través de un ejemplo: el producto NST 10 es potencialmente trasvasable: por un lado, tiene alta participación en el ferrocarril, el transporte de este producto por parte de RENFE ha experimentado un incremento del 45,06% entre 1980 y 2010, representa un 29,8% en la carretera, y su captación por el ferrocarril representaría decrementos poco significativos en la carretera y muy importantes para el otro modo.

La hipótesis de partida es que mantendría la cuota ferroviaria de 2010. A nivel agregado (todo el territorio) este producto representa el 6,65% del total terrestre, y puede ser considerado el extremo inferior de la horquilla, si se asumiera que esa proporción es uniforme en todos los ejes de transporte en los que existan tráficos del grupo NST 10.

De acuerdo con la segunda hipótesis, se puede fijar el extremo superior en un escenario de duplicación de las toneladas transportadas en 13,3 de 100+6,65=106,65 en 2020.

4.5 Modelado de emisiones

Los factores de emisión se estiman a través del modelo COPERT, que depende de una serie de parámetros del tipo de vehículo (peso, potencia, número de ejes, carga media, factor de ocupación, antigüedad, normativa de emisiones) y del recorrido (distancia, consumo medio, velocidad media). Por ejemplo, una de las expresiones más sencillas en función de la velocidad es:

$$EF = \frac{1}{(a + bV)}$$

Se puede entonces asignar incertidumbre tanto a los parámetros (a , b en este caso) como a la velocidad media V . La incertidumbre se cuantifica a través de intervalos de confianza frecuentistas y, en caso de aplicar el enfoque bayesiano, a través de intervalos de (por ejemplo) 95% de probabilidad de las distribuciones a posteriori o predictivas.

La incertidumbre asociada a , b y V se propaga al factor de emisión EF a través de la expresión anterior.

Hipótesis

- Se supone independencia entre las variables aleatorias a , b y V y de estas tres respecto de las variables aleatorias de las etapas anteriores del simulador.

El procesador podría considerar la incertidumbre del resto de parámetros, como por ejemplo del factor de ocupación de los vehículos, entre otros. En cada uno de ellos se utilizarían distribuciones uniformes o gaussianas que deben calibrarse (estimarse) a partir de datos de carga media, provenientes de la encuesta de transporte de mercancías (EPTMC varios años). El coeficiente de variación puede adoptarse para establecer la horquilla de incertidumbre, sea con la distribución uniforme o con la normal.

En relación al tipo de vehículo de transporte, se ha caracterizado el tráfico en el eje

seleccionado, a través de datos de aforos en 2 secciones transversales del mismo, por los que han pasado más de 48.500 vehículos y obtenidos en otro proyecto llevado a cabo por el equipo investigador. Si se consideran solo los vehículos pesados de más de 12 metros, el 93% -sentido M-G, 80%-sentido G-M que han pasado por el emplazamiento del radar medían entre 12,1 y 16 metros, el 5% entre 16,1 y los de más de 18,75 metros son el 3%. De la encuesta de transporte de mercancías por carretera (EPTMC 2010) se extrae que los vehículos más frecuentes son los de tractor + semirremolque que miden entre 12,1 y 16 m y cuentan con cinco ejes: el 93,2% en el sentido M-G y el 89,7% en el trayecto de vuelta G-M, lo que muestra coherencia entre ambas fuentes. Todos estos vehículos corresponden al vehículo tractor más semirremolque.

La antigüedad de los vehículos pesados de transporte de mercancías que se extrae de la EPTMC del año 2010, es próxima a los 6 años.

De los aforos la velocidad media de los vehículos pesados es de 82,38 km/h para los vehículos de entre 12 y 16 metros, y de 84,60 para los vehículos de entre 16,1 y 18,75 metros.

Las velocidades medias medidas exceden la velocidad límite para vehículos pesados que está establecido en 80 km/h en autovías. Pero debe tenerse en cuenta que la velocidad más elevada puede responder al hecho que las medidas se han realizado en sitios en los que es posible desarrollar velocidad de flujo libre: rectas, sin señalización de limitación de la velocidad y con buenas condiciones meteorológicas. También que no es posible distinguir los autocares de los vehículos pesados de mercancías y que podrían ser los vehículos que elevan la velocidad media asignada a los pesados de mercancías.

5. DISCUSIÓN

En la figura 2 se presenta la predicción puntual y la banda de confianza para un ejercicio de validación cruzada en el cual se ha descompuesto la serie en dos partes: la primera es la serie truncada en sus cuatro últimos valores (trimestres) se ha utilizado para estimar el modelo y predecir valores futuros y con la segunda (cuatro últimos trimestres) se han comparado valores reales con predichos. Para el caso de la gráfica se ha aplicado un modelo univariante. Con un modelo bivariante (función de transferencia) las predicciones han resultado peores, con una tendencia aproximadamente constante en la predicción que no acompaña al decrecimiento de la serie real, en contraste con la predicción del modelo univariante, que se acerca significativamente más. La dificultad de predicciones certeras a corto plazo es un indicador de la gran incertidumbre asociada al análisis de largo plazo, es decir de escenarios con horizonte 2020, para el cual la inercia de los datos actuales se ha diluido en gran medida. Sin embargo, esta gran incertidumbre es inevitable y no existe alternativa razonable a este enfoque. La solución es la asignación de probabilidades a los distintos escenarios de largo plazo para que todas las incertidumbres sean cuantificadas. En este sentido, las emisiones finales predichas serán una mezcla de las resultantes de los distintos escenarios, con pesos dados por las probabilidades asignadas. El resultado final de la simulación es una muestra de MC para la variable aleatoria “emisiones” producidas por

el transporte por carretera. Esta muestra permite la estimación de la distribución de esta variable aleatoria (medias, varianzas, percentiles).

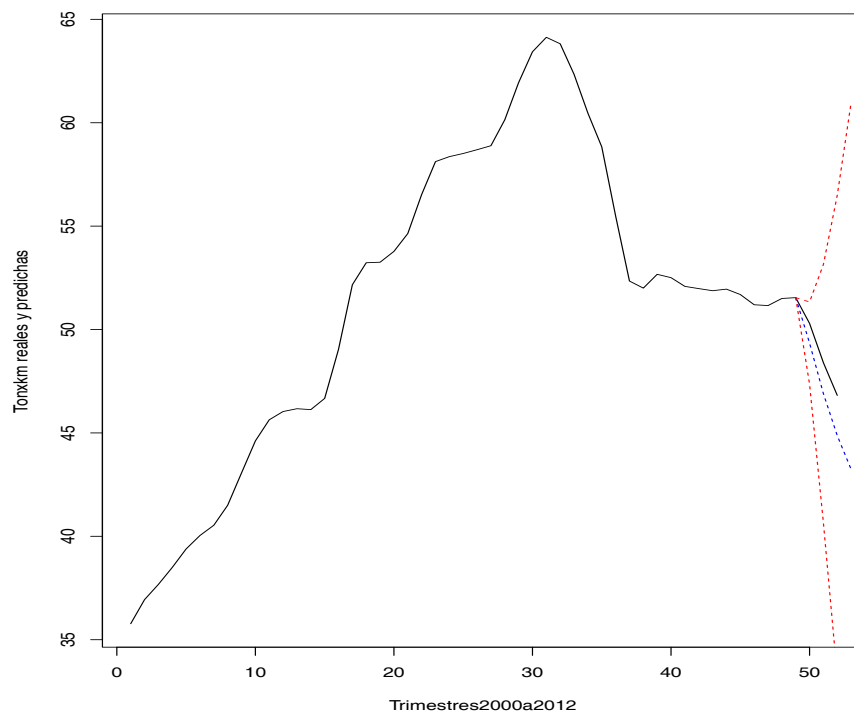


Fig 2: Validación cruzada para las t con modelo univariante1

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el marco del proyecto “Desarrollo de una metodología integrada para la evaluación de externalidades (seguridad y el medio ambiente) del trasvase modal carretera – ferrocarril” MODALTRAM. Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2008-2011, Ministerio de Ciencia e Innovación (I+D+i)- Sub-programa de investigación fundamental no orientada. TRA2011-28647-C02-01. Además, los autores también quieren agradecer la financiación parcial de este trabajo a la Comunidad de Madrid, que mediante el programa SEGVAUTO (S2009/DPI-1509), ha contribuido al desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Box, G., Jenkins, G., y Reinsel, T., (1994). *Time Series Analysis. Forecasting and Control*. Prentice Hall.
- Metropolis, N, Rosenbluth, A.W., Teller, A.H, Teller, E., (1953), Equations of State calculations by Fast Computing Machines. *Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
- Peña, D., (2005). *Análisis de Series Temporales*. Alianza Editorial.
- Pfaff, B., (2008), *Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R*. Springer
- Tegner, G., Holmberg, I., Loncar – Lucasi, V., Nilsson, C., (2000).
- Libro Blanco de Transporte 2011”. Comisión Europea
- R Development Core Team, 2008
- COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model. V4 software